

JP 2018-189465 A 2018.11.29

(19) **日本国特許庁(JP)**

(12) **公開特許公報(A)**

(11)特許出願公開番号

**特開2018-189465**

(P2018-189465A)

(43) 公開日 平成30年11月29日(2018.11.29)

(51) Int.Cl.

F I

テーマコード (参考)

G21K 5/04 (2006.01)

G2 1 K 5/04

D

2G085

H05H 13/04 (2006.01)

H05H 13/04

N

4C082

**A 6 1 N 5/10 (2006.01)**

H05H 13/04

R

G2 1 K 1/04 (2006.01)

A 6 1 N 5/10

H

G2 1 K 1/04

S

審査請求 未請求 請求項の数 15 O L (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2017-91279 (P2017-91279)

(22) 出願日 平成29年5月1日(2017.5.1)

(71) 出願人 317015294

東芝エネルギーシステムズ株式会社

神奈川 県川崎市幸区堀川町72番地34

(71) 出願人 301032942

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号

(74) 代理人 110001634

特許業務法人 志賀国際特許事務所

(72) 發明者 松本 宗道

東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社  
東芝内

[最終頁に続く](#)

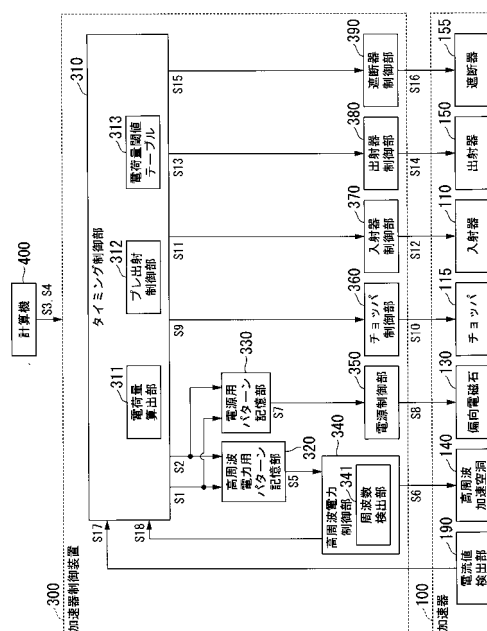
(54) 【発明の名称】 加速器制御装置、加速器制御方法、および粒子線治療装置

(57) 【要約】

【課題】低エネルギーの荷電粒子ビームを出射する場合であっても、ビームスパイクの発生を防止することができる加速器制御装置、加速器制御方法、および粒子線治療装置を提供すること。

【解決手段】実施形態の加速器制御装置は、高周波電力制御部と、タイミング制御部とを持つ。高周波電力制御部は、荷電粒子ビームを加速させるための高周波電力を加速器に供給する。タイミング制御部は、前記加速器内を周回する前記荷電粒子ビームの電流値に基づいて、前記加速器から出射された前記荷電粒子ビームを遮断する遮断器の動作タイミングを制御する。

【選択図】図2



**【特許請求の範囲】****【請求項 1】**

荷電粒子ビームを加速させるための高周波電力を加速器に供給する高周波電力制御部と、  
前記加速器内を周回する前記荷電粒子ビームの電流値に基づいて、前記加速器から出射された前記荷電粒子ビームを遮断する遮断器の動作タイミングを制御するタイミング制御部と、  
を備える加速器制御装置。

**【請求項 2】**

前記荷電粒子ビームが前記加速器内を周回する周波数を検出する周波数検出部と、  
前記加速器内を周回する前記荷電粒子ビームの前記電流値を、前記周波数検出部によって検出された周波数で除算することによって、前記荷電粒子ビームの電荷量を算出する電荷量算出部を更に備え、  
前記タイミング制御部は、前記電荷量算出部によって算出された前記電荷量に基づいて、前記遮断器の動作タイミングを制御する  
請求項 1 記載の加速器制御装置。

10

**【請求項 3】**

前記タイミング制御部は、  
前記荷電粒子ビームのエネルギーと、前記荷電粒子ビームの電荷量の閾値とが対応付けられた第 1 テーブルを保持し、  
前記加速器内を周回する前記荷電粒子ビームのエネルギーに対応する前記閾値を前記第 1 テーブルから取得し、  
前記電荷量算出部によって算出された前記電荷量と、前記第 1 テーブルから取得された前記閾値との比較に基づいて、前記遮断器の動作タイミングを制御する  
請求項 2 記載の加速器制御装置。

20

**【請求項 4】**

前記タイミング制御部は、  
前記電荷量算出部によって算出された前記電荷量が、前記第 1 テーブルから取得された前記閾値以上の場合には、前記遮断器を制御して前記荷電粒子ビームを遮断させ、  
前記電荷量算出部によって算出された前記電荷量が、前記第 1 テーブルから取得された前記閾値未満の場合には、前記遮断器を制御して前記荷電粒子ビームを通過させる  
請求項 3 記載の加速器制御装置。

30

**【請求項 5】**

前記第 1 テーブルは、エネルギーの範囲を区切るための境界エネルギーを含み、前記境界エネルギーによって区切られたエネルギーの範囲ごとに、前記荷電粒子ビームの電荷量の前記閾値が対応付けられている  
請求項 3 または 4 記載の加速器制御装置。

**【請求項 6】**

前記第 1 テーブルは、前記荷電粒子ビームのエネルギーが低いほど、当該エネルギーに対応付けられる前記閾値が小さくなるように設定されている  
請求項 3 から 5 のいずれか一項に記載の加速器制御装置。

40

**【請求項 7】**

前記加速器に入射される前記荷電粒子ビームの量を調整するためのチョッパを制御するチョッパ制御部を更に備え、  
前記タイミング制御部は、  
前記荷電粒子ビームのエネルギーと、前記チョッパを駆動するためのパルス信号のパルス幅とが対応付けられた第 2 テーブルを保持し、  
前記荷電粒子ビームが前記加速器から出射される際の前記荷電粒子ビームのエネルギーに対応する前記パルス幅を前記第 2 テーブルから取得し、  
前記チョッパ制御部は、

50

前記タイミング制御部によって取得された前記パルス幅に基づいて、前記チョッパの動作タイミングを制御する

請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の加速器制御装置。

【請求項 8】

前記第 2 テーブルは、エネルギーの範囲を区切るための境界エネルギーを含み、前記境界エネルギーによって区切られたエネルギーの範囲ごとに、前記パルス幅が対応付けられている

請求項 7 記載の加速器制御装置。

【請求項 9】

前記第 2 テーブルは、前記荷電粒子ビームのエネルギーが低いほど、当該エネルギーに対応付けられる前記パルス幅が小さくなるように設定されている

10

請求項 7 または 8 記載の加速器制御装置。

【請求項 10】

前記タイミング制御部は、

前記荷電粒子ビームのエネルギーと、前記荷電粒子ビームの電流値の閾値とが対応付けられた第 3 テーブルを保持し、

前記加速器内を周回する前記荷電粒子ビームのエネルギーに対応する前記閾値を前記第 3 テーブルから取得し、

前記加速器内を周回する前記荷電粒子ビームの電流値と、前記第 3 テーブルから取得された前記閾値との比較に基づいて、前記遮断器の動作タイミングを制御する

20

請求項 1 記載の加速器制御装置。

【請求項 11】

前記タイミング制御部は、

前記加速器内を周回する前記荷電粒子ビームの前記電流値が、前記第 3 テーブルから取得された前記閾値以上の場合には、前記遮断器を制御して前記荷電粒子ビームを遮断させる、

前記加速器内を周回する前記荷電粒子ビームの前記電流値が、前記第 3 テーブルから取得された前記閾値未満の場合には、前記遮断器を制御して前記荷電粒子ビームを通過させる

請求項 10 記載の加速器制御装置。

30

【請求項 12】

前記第 3 テーブルは、エネルギーの範囲を区切るための境界エネルギーを含み、前記境界エネルギーによって区切られたエネルギーの範囲ごとに、前記荷電粒子ビームの電流値の前記閾値が対応付けられている

請求項 10 または 11 記載の加速器制御装置。

【請求項 13】

前記第 3 テーブルは、前記荷電粒子ビームのエネルギーが低いほど、当該エネルギーに対応付けられる前記閾値が小さくなるように設定されている

請求項 10 から 12 のいずれか一項に記載の加速器制御装置。

【請求項 14】

荷電粒子ビームを加速する加速器を制御する加速器制御方法であって、  
高周波電力制御部が、前記荷電粒子ビームを加速させるための高周波電力を前記加速器に供給し、

タイミング制御部が、前記加速器内を周回する前記荷電粒子ビームの電流値に基づいて、前記加速器から出射された前記荷電粒子ビームを遮断する遮断器の動作タイミングを制御する

加速器制御方法。

【請求項 15】

荷電粒子ビームを加速する加速器と

前記荷電粒子ビームを加速させるための高周波電力を前記加速器に供給する高周波電力

50

制御部と、

前記加速器によって加速された前記荷電粒子ビームを出射する出射器と、

前記出射器によって出射された前記荷電粒子ビームを遮断する遮断器と、

前記加速器内を周回する前記荷電粒子ビームの電流値を検出する電流値検出部と、

前記電流値検出部によって検出された前記電流値に基づいて、前記遮断器の動作タイミングを制御するタイミング制御部と、

を備える粒子線治療装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

10

本発明の実施形態は、加速器制御装置、加速器制御方法、および粒子線治療装置に関する。

【背景技術】

【0002】

一般的に、粒子線治療装置には、荷電粒子ビームを所望のエネルギーまで加速するための加速器が設けられている。加速器には、複数の電極を備える高周波加速空洞が設けられている。粒子線治療装置は、高周波加速空洞に設けられた電極に高周波電力を供給することで荷電粒子ビームを所望のエネルギーまで加速し、加速した荷電粒子ビームを腫瘍等の患部に照射する。

【0003】

20

しかしながら、加速器によって一定のエネルギーまで加速された荷電粒子ビームが出射された直後において、荷電粒子ビームの強度が目標値を超えるビームスパイクという現象が発生する場合があった。ビームスパイクは、特に低エネルギーの荷電粒子ビームが出射される際に発生しやすい。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特許第4873563号公報

【非特許文献】

【0005】

30

【非特許文献1】K. Mizushima et al., "RELIABLE BEAM-INTENSITY CONTROL TECHNIQUE AT THE HIMAC SYNCHROTRON", Proceedings of the 1st International Beam Instrumentation Conference, pp. 143-145, Tsukuba, Japan, 2012.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

本発明が解決しようとする課題は、低エネルギーの荷電粒子ビームを出射する場合であっても、ビームスパイクの発生を防止することができる加速器制御装置、加速器制御方法、および粒子線治療装置を提供することである。

【課題を解決するための手段】

40

【0007】

実施形態の加速器制御装置は、高周波電力制御部と、タイミング制御部とを持つ。高周波電力制御部は、荷電粒子ビームを加速させるための高周波電力を加速器に供給する。タイミング制御部は、前記加速器内を周回する前記荷電粒子ビームの電流値に基づいて、前記加速器から出射された前記荷電粒子ビームを遮断する遮断器の動作タイミングを制御する。

【図面の簡単な説明】

【0008】

【図1】第1の実施形態に係る粒子線治療装置10の全体構成を示すブロック図。

【図2】第1の実施形態に係る加速器制御装置300の構成を示すブロック図。

50

【図 3】第 1 の実施形態に係る電源用パターン 5 4 の一例を示す図。

【図 4】ビームスパイクが発生する場合の遮断器 1 5 5 の制御の一例を示すタイミングチャート。

【図 5】第 1 の実施形態に係る遮断器 1 5 5 の制御の一例を示すタイミングチャート。

【図 6】第 1 の実施形態に係る電荷量閾値テーブル 3 1 3 の一例を示す図。

【図 7】第 1 の実施形態に係る電荷量閾値テーブル 3 1 3 の他の例を示す図。

【図 8】第 1 の実施形態に係る電荷量閾値テーブル 3 1 3 の他の例を示す図。

【図 9】第 1 の実施形態に係る遮断器 1 5 5 の制御の他の例を示すタイミングチャート。

【図 1 0】第 2 の実施形態に係る加速器制御装置 3 0 0 の構成を示すブロック図。

【図 1 1】第 2 の実施形態に係る遮断器 1 5 5 およびチョッパ 1 1 5 の制御の一例を示すタイミングチャート。 10

【図 1 2】第 2 の実施形態に係るパルス幅閾値テーブル 3 1 5 の一例を示す図。

【図 1 3】第 2 の実施形態に係るパルス幅閾値テーブル 3 1 5 の他の例を示す図。

【図 1 4】第 2 の実施形態に係るパルス幅閾値テーブル 3 1 5 の他の例を示す図。

【図 1 5】第 3 の実施形態に係る加速器制御装置 3 0 0 の構成を示すブロック図。

【図 1 6】第 3 の実施形態に係る電流値閾値テーブル 3 1 6 の一例を示す図。

【図 1 7】第 3 の実施形態に係る電流値閾値テーブル 3 1 6 の他の例を示す図。

【図 1 8】第 3 の実施形態に係る電流値閾値テーブル 3 1 6 の他の例を示す図。

【発明を実施するための形態】

【0 0 0 9】

20

以下、実施形態の加速器制御装置、加速器制御方法、および粒子線治療装置を、図面を参照して説明する。実施形態の加速器制御装置は、粒子線治療装置に適用できる他、荷電粒子ビームを利用する種々の装置に適用可能である。例えば、荷電粒子ビームを照射することにより対象物を加工するエッチング装置等にも適用することができる。

【0 0 1 0】

(第 1 の実施形態)

図 1 は、第 1 の実施形態に係る粒子線治療装置 1 0 の全体構成を示すブロック図である。粒子線治療装置 1 0 は、荷電粒子ビームを所望のエネルギーまで加速し、加速した荷電粒子ビームを腫瘍等の患部に照射する装置である。粒子線治療装置 1 0 は、加速器 1 0 0 と、照射装置 2 0 0 と、加速器制御装置 3 0 0 とを備える。 30

【0 0 1 1】

加速器 1 0 0 は、入射器 1 1 0 と、チョッパ 1 1 5 と、複数の四極電磁石 1 2 0 a から 1 2 0 h と、複数の偏向電磁石 1 3 0 a から 1 3 0 d と、高周波加速空洞 1 4 0 と、出射器 1 5 0 と、電流値検出部 1 9 0 とを備える。

【0 0 1 2】

入射器 1 1 0 は、荷電粒子ビームを加速器 1 0 0 内の周回軌道に入射させる。チョッパ 1 1 5 は、加速器 1 0 0 に入射される荷電粒子ビームの量を調整するために設けられる。チョッパ 1 1 5 として、例えば、荷電粒子ビームを偏向するための電気的あるいは磁気的な力を時間的に切り替えて与えることにより、加速器 1 0 0 に入射する荷電粒子ビームの入射量を調整するビームチョッパが用いられる。四極電磁石 1 2 0 a から 1 2 0 h は、荷電粒子ビームが周回軌道を安定して周回するように、荷電粒子ビームを収束または発散させる電磁石である。 40

【0 0 1 3】

偏向電磁石 1 3 0 a から 1 3 0 d は、荷電粒子ビームを偏向することにより、荷電粒子ビームを加速器 1 0 0 内で周回させる電磁石である。電流値検出部 1 9 0 は、加速器 1 0 0 内を周回する荷電粒子ビームの電流値を検出する。

【0 0 1 4】

高周波加速空洞 1 4 0 には、複数の電極が設けられている。荷電粒子ビームは、高周波加速空洞 1 4 0 に設けられた複数の電極に電圧が印加されることによって加速される。出射器 1 5 0 は、加速器 1 0 0 に設けられた出射用電極に高周波電場を印加することにより 50

、加速器 100 内の周回軌道を周回する荷電粒子ビームの一部を照射装置 200 に向けて出射する。

【0015】

加速器 100 から照射装置 200 までの経路には、遮断器 155 と、複数の四極電磁石 160a から 160d と、複数の補正電磁石 170a から 170d と、偏向電磁石 180 とが設けられている。遮断器 155 は、加速器から出射された荷電粒子ビームを遮断するシャッターであるが、照射装置 200 に至るビーム量を制御できればこれに限られない。例えば、遮断器 155 は、加速器から出射された荷電粒子ビームを、照射装置 200 への経路とは異なる経路に導く偏向電磁石または、電場を発生する電極等であってもよい。

【0016】

四極電磁石 160a から 160d は、荷電粒子ビームが、加速器 100 から照射装置 200 までの経路を安定して通過し、照射位置において荷電粒子ビームが目的のビーム径になるように、荷電粒子ビームを収束または発散させる電磁石である。偏向電磁石 180 は、荷電粒子ビームを偏向し、荷電粒子ビームを加速器 100 から照射装置 200 まで導くための電磁石である。補正電磁石 170a から 170d は、加速器 100 から照射装置 200 までの荷電粒子ビームの軌道を補正するための電磁石である。

【0017】

照射装置 200 は、治療室に設置され、加速器 100 によって加速された荷電粒子ビームを腫瘍等の患部に照射する装置である。照射装置 200 は、線量モニタ 210 を備える。線量モニタ 210 は、患部に照射される荷電粒子ビームの強度を検出する。

【0018】

加速器制御装置 300 は、荷電粒子ビームを加速する加速器 100 を制御する装置である。以下、加速器制御装置 300 の詳細な構成について説明する。

【0019】

図 2 は、第 1 の実施形態に係る加速器制御装置 300 の構成を示すブロック図である。加速器制御装置 300 は、タイミング制御部 310 と、高周波電力用パターン記憶部 320 と、電源用パターン記憶部 330 と、高周波電力制御部 340 と、電源制御部 350 と、チョッパ制御部 360 と、入射器制御部 370 と、出射器制御部 380 と、遮断器制御部 390 とを備える。

【0020】

タイミング制御部 310、高周波電力制御部 340、電源制御部 350、チョッパ制御部 360、入射器制御部 370、出射器制御部 380、および遮断器制御部 390 は、ハードウェアにより実現される。かかるハードウェアとして、例えば、FPGA (Field-Programmable Gate Array)、LSI (Large Scale Integration)、および ASIC (Application Specific Integrated Circuit) 等が挙げられる。

【0021】

なお、加速器制御装置 300 は、CPU (Central Processing Unit) 等のプロセッサと、プロセッサが実行するプログラムを格納するプログラムメモリとを備えてもよい。この場合、プロセッサがプログラムメモリに記憶されたプログラムを実行することで、タイミング制御部 310、高周波電力制御部 340、電源制御部 350、チョッパ制御部 360、入射器制御部 370、出射器制御部 380、および遮断器制御部 390 を実現してもよい。

【0022】

タイミング制御部 310 は、加速器 100 に荷電粒子ビームを入射するタイミングを制御するとともに、加速器 100 から荷電粒子ビームを出射するタイミングを制御する。

【0023】

図 2 に示されるように、タイミング制御部 310 は、荷電粒子ビームを加速器 100 内の周回軌道に入射する場合には、ビーム入射信号 S11 を入射器制御部 370 に出力する。入射器制御部 370 は、タイミング制御部 310 から入力されたビーム入射信号 S11 に応じて、加速器 100 に設けられた入射器 110 に入射用電力 S12 を供給する。入射

10

20

30

40

50

器 1 1 0 は、入射用電力 S 1 2 が入射器制御部 3 7 0 から供給されると、荷電粒子ビームを加速器 1 0 0 内の周回軌道に入射する。

【 0 0 2 4 】

また、タイミング制御部 3 1 0 は、荷電粒子ビームを加速器 1 0 0 内の周回軌道から出射する場合には、ビーム出射信号 S 1 3 を出射器制御部 3 8 0 に出力する。出射器制御部 3 8 0 は、タイミング制御部 3 1 0 から入力されたビーム出射信号 S 1 3 に応じて、加速器 1 0 0 に設けられた出射器 1 5 0 に出射用電力 S 1 4 を供給する。出射器 1 5 0 は、出射用電力 S 1 4 が出射器制御部 3 8 0 から供給されると、荷電粒子ビームを加速器 1 0 0 内の周回軌道から照射装置 2 0 0 に向けて出射する。

【 0 0 2 5 】

タイミング制御部 3 1 0 は、荷電粒子ビームを遮断する遮断器 1 5 5 の動作タイミングを制御するとともに、加速器 1 0 0 に入射される荷電粒子ビームの量を調整するためのチョッパ 1 1 5 の動作タイミングを制御する。

【 0 0 2 6 】

図 2 に示されるように、タイミング制御部 3 1 0 は、入射器 1 1 0 から入射された荷電粒子ビームの量を調整する場合には、チョッパパルス信号 S 9 をチョッパ制御部 3 6 0 に出力する。チョッパ制御部 3 6 0 は、タイミング制御部 3 1 0 から入力されたチョッパパルス信号 S 9 が ON の間、加速器 1 0 0 に設けられたチョッパ 1 1 5 にチョッパ用電力 S 1 0 を供給する。チョッパ 1 1 5 は、チョッパ制御部 3 6 0 からチョッパ用電力 S 1 0 が供給されると、入射器 1 1 0 から入射された荷電粒子ビームを通過させる。一方、チョッパ 1 1 5 は、チョッパ制御部 3 6 0 からチョッパ用電力 S 1 0 が供給されていない場合には、入射器 1 1 0 から入射された荷電粒子ビームを遮断する。

【 0 0 2 7 】

なお、チョッパ制御部 3 6 0 は、チョッパパルス信号 S 9 が ON の間、チョッパ 1 1 5 にチョッパ用電力 S 1 0 を供給し、チョッパパルス信号 S 9 が OFF の間、チョッパ 1 1 5 にチョッパ用電力 S 1 0 を供給しないこととしたが、これに限られない。例えば、チョッパ制御部 3 6 0 は、チョッパパルス信号 S 9 が ON の間、チョッパ 1 1 5 にチョッパ用電力 S 1 0 を供給せず、チョッパパルス信号 S 9 が OFF の間、チョッパ 1 1 5 にチョッパ用電力 S 1 0 を供給してもよい。

【 0 0 2 8 】

また、タイミング制御部 3 1 0 は、出射器 1 5 0 から出射された荷電粒子ビームを遮断する場合には、遮断器駆動信号 S 1 5 を遮断器制御部 3 9 0 に出力する。遮断器制御部 3 9 0 は、タイミング制御部 3 1 0 から入力された遮断器駆動信号 S 1 5 が ON の間、遮断器 1 5 5 に遮断器用電力 S 1 6 を供給する。遮断器 1 5 5 は、遮断器制御部 3 9 0 から遮断器用電力 S 1 6 が供給されると、出射器 1 5 0 から出射された荷電粒子ビームを遮断する。一方、遮断器 1 5 5 は、遮断器制御部 3 9 0 から遮断器用電力 S 1 6 が供給されていない場合には、出射器 1 5 0 から出射された荷電粒子ビームを通過させる。

【 0 0 2 9 】

なお、遮断器制御部 3 9 0 は、遮断器駆動信号 S 1 5 が ON の間、遮断器 1 5 5 に遮断器用電力 S 1 6 を供給し、遮断器駆動信号 S 1 5 が OFF の間、遮断器 1 5 5 に遮断器用電力 S 1 6 を供給しないこととしたが、これに限られない。例えば、遮断器制御部 3 9 0 は、遮断器駆動信号 S 1 5 が ON の間、遮断器 1 5 5 に遮断器駆動信号 S 1 5 を供給せず、遮断器駆動信号 S 1 5 が OFF の間、遮断器 1 5 5 に遮断器駆動信号 S 1 5 を供給してもよい。

【 0 0 3 0 】

加速器制御装置 3 0 0 には、ネットワークを介して計算機 4 0 0 が接続されている。操作者が高周波電力用パターン S 3 および電源用パターン S 4 を計算機 4 0 0 に入力すると、計算機 4 0 0 は、入力された高周波電力用パターン S 3 および電源用パターン S 4 を加速器制御装置 3 0 0 に送信する。加速器制御装置 3 0 0 は、計算機 4 0 0 から高周波電力用パターン S 3 および電源用パターン S 4 を受信すると、受信した高周波電力用パターン

10

20

30

40

50

S 3 を高周波電力用パターン記憶部 3 2 0 に記憶するとともに、受信した電源用パターン S 4 を電源用パターン記憶部 3 3 0 に記憶する。なお、計算機 4 0 0 は、出射器制御部 3 8 0 の動作ロジックに必要な設定値や、タイミング制御部 3 1 0 の動作ロジックに必要な設定値を設定することも可能である。

#### 【 0 0 3 1 】

ここで、高周波電力用パターン S 3 は、高周波加速空洞 1 4 0 に設けられた複数の電極に供給される電力を制御するための電力指令パターンを示すデータである。具体的に、高周波電力用パターン S 3 は、高周波加速空洞 1 4 0 に設けられた複数の電極に印加される電圧の振幅を指令する電圧指令値の集合と、この複数の電極に印加される電圧の周波数を指令する周波数指令値の集合とを含み、特定の順序で実行（出力）される（電圧指令値 S 5 として読み出される）。

10

#### 【 0 0 3 2 】

また、電源用パターン S 4 は、加速器 1 0 0 に設けられた複数の偏向電磁石 1 3 0 a から 1 3 0 d に供給される電流を制御するための電流指令パターンを示すデータである。即ち、電源用パターン S 4 は、加速器 1 0 0 に設けられた複数の偏向電磁石 1 3 0 a から 1 3 0 d に供給される電流を指令する電流指令値の集合であり、特定の順序で実行（出力）される（電流指令値 S 7 として読み出される）。

#### 【 0 0 3 3 】

タイミング制御部 3 1 0 は、リセット信号 S 1 とクロック信号 S 2 とを、高周波電力用パターン記憶部 3 2 0 に出力する。リセット信号 S 1 は、電圧指令値 S 5 を高周波電力用パターン S 3 の最初のデータから生成するよう（最初のデータから読み出すよう）にリセットするための信号である。クロック信号 S 2 は、電圧指令値 S 5 を高周波電力用パターン S 3 の次のデータから生成されるよう（次のデータから読み出すよう）に更新する際に用いられる同期信号である。

20

#### 【 0 0 3 4 】

また、タイミング制御部 3 1 0 は、リセット信号 S 1 とクロック信号 S 2 とを、電源用パターン記憶部 3 3 0 にも出力する。リセット信号 S 1 は、電流指令値 S 7 を電源用パターン S 4 の最初のデータから生成するよう（最初のデータから読み出すよう）にリセットするための信号でもある。クロック信号 S 2 は、電流指令値 S 7 を電源用パターン S 4 の次のデータから生成されるよう（次のデータから読み出すよう）に更新する際に用いられる同期信号でもある。

30

#### 【 0 0 3 5 】

図 3 は、第 1 の実施形態に係る電源用パターン S 4 の一例を示す図である。図 3 に示される電源用パターン S 4 において、横軸は時間を示し、縦軸は電源制御部 3 5 0 から偏向電磁石 1 3 0 a から 1 3 0 d に供給される電流を制御するための電流指令値を示す。即ち、図 3 に示される電源用パターン S 4 は、図中最左の電流指令値（最初の電流指令値）から電流指令値 S 7 として読み出される。また、クロック信号 S 2 が入力される度に次の（右隣の）電流指令値が順に、電流指令値 S 7 として読み出される。なお、電流指令値が増大すると、偏向電磁石 1 3 0 a から 1 3 0 d に供給される電流を増大させることができ、電流指令値が減少すると、偏向電磁石 1 3 0 a から 1 3 0 d に供給される電流を減少させることができる。

40

#### 【 0 0 3 6 】

詳細は後述するが、図 3 に示される電源用パターン S 4 は、電流指令値が電流指令値 A 1 まで増大し、その後、電流指令値 A 2、電流指令値 A 3、・・・、電流指令値 A n へと減少するパターンである。ここで、リセット信号 S 1 が電源用パターン記憶部 3 3 0 に入力されると、電源用パターン S 4 の最初の電流指令値（図 3 の最左の電流指令値）から順に実行するよう強制される。

#### 【 0 0 3 7 】

具体的に、電源制御部 3 5 0 は、クロック信号 S 2 の入力回数をカウントし、カウント値に対応する電流指令値 S 7 を電源用パターン記憶部 3 3 0 から読み出す。電源制御部 3

50



50は、電源用パターン記憶部330から読み出した電流指令値S7に応じた電流S8を、偏向電磁石130aから130dに供給する。電源制御部350は、クロック信号S2がタイミング制御部310から入力される度に、この動作を繰り返す。

#### 【0038】

リセット信号S1が出力されるタイミング付近における電源用パターンS4は、荷電粒子ビームの入射レベルのエネルギーに相当する電流指令値を示す。この電流指令値が電源制御部350に出力されている際に、タイミング制御部310がビーム入射信号S11を入射器制御部370に出力すると、入射器制御部370は、入射器110に入射用電力S12を供給する。入射器110に入射用電力S12が供給されると、イオン源（不図示）から荷電粒子ビームが出力され、入射器110が荷電粒子ビームを入射エネルギーまで加速する。

10

#### 【0039】

また、タイミング制御部310は、ビーム入射信号S11より少し遅れたタイミングで、チョッパパルス信号S9をチョッパ制御部360に出力する。チョッパ制御部360は、タイミング制御部310から入力されたチョッパパルス信号S9がONの間、加速器100に設けられたチョッパ115にチョッパ用電力S10を供給する。チョッパ115は、チョッパ制御部360からチョッパ用電力S10が供給されると、入射器110から入射された荷電粒子ビームを通過させる。

#### 【0040】

チョッパ115を通過した荷電粒子ビームは、加速器100の周回軌道に入射する。その後、電源用パターン記憶部330から出力される電流指令値S7、および高周波電力用パターン記憶部320から出力される電圧指令値S5に応じて、荷電粒子ビームに加速エネルギーが与えられる。これによって、荷電粒子ビームは、加速器100内を周回し、加速していく。

20

#### 【0041】

加速器100に設けられた四極電磁石120aから120hに与えられる電流や、不図示の他の電磁石に与えられる電流値についても、同様の制御が行われる。通常は、電源用パターン記憶部330から出力される電流指令値S7、および高周波電力用パターン記憶部320から出力される電圧指令値S5に応じて、リセット、入射、加速、減速が繰り返される。

30

#### 【0042】

電流指令値S7は、荷電粒子ビームのエネルギーの大きさを直接的に表すものではない。しかしながら、電流指令値S7は、荷電粒子ビームのエネルギー（速さ）に基づいて一意に決定される値であり、荷電粒子ビームのエネルギーが高い場合は偏向電磁石130aから130dに供給される電流を大きくする必要がある。このため、図2に示される電流指令値S7は、荷電粒子ビームのエネルギーの大きさと解釈することもできる。

#### 【0043】

なお、高周波電力制御部340についても同様に、クロック信号S2の入力回数をカウントし、カウント値に対応する電圧指令値S5を高周波電力用パターン記憶部320から読み出す。高周波電力制御部340は、高周波電力用パターン記憶部320から読み出した電圧指令値S5に応じた電圧S6を、高周波加速空洞140に設けられた複数の電極に印加する。高周波電力制御部340は、クロック信号S2がタイミング制御部310から入力される度に、この動作を繰り返す。

40

#### 【0044】

加速器100に設けられた電流値検出部190は、加速器100内を周回する荷電粒子ビームの電流値S17を検出し、検出した電流値S17を加速器制御装置300に送信する。電流値検出部190から送信された電流値S17は、タイミング制御部310に入力される。

#### 【0045】

一方、高周波電力制御部340は、周波数検出部341を備える。周波数検出部341

50

は、荷電粒子ビームが加速器 100 内を周回する周波数 S 18 を検出する。例えば、周波数検出部 341 は、高周波電力制御部 340 から高周波加速空洞 140 に印加される電圧の周波数に基づいて、荷電粒子ビームが加速器 100 内を周回する周波数 S 18 を検出する。周波数検出部 341 は、検出した周波数 S 18 をタイミング制御部 310 に出力する。

#### 【0046】

タイミング制御部 310 は、電荷量算出部 311 と、プレ出射制御部 312 と、電荷量閾値テーブル 313 (第 1 テーブル) とを備える。電荷量算出部 311 は、電流値検出部 190 によって検出された電流値 S 17 を、周波数検出部 341 によって検出された周波数 S 18 で除算することによって、荷電粒子ビームの電荷量を算出する。

10

#### 【0047】

加速器 100 によって一定のエネルギーまで加速された荷電粒子ビームが出射された直後において、荷電粒子ビームの強度が目標値を超えるビームスパイクという現象が発生する場合がある。このため、プレ出射制御部 312 は、ビームスパイクの発生を防止するために、プレ出射を行う。「プレ出射」とは、遮断器 155 が閉じられた状態で、荷電粒子ビームを加速器 100 内の周回軌道から照射装置 200 に向けて出射する動作である。

#### 【0048】

図 4 は、ビームスパイクが発生する場合の遮断器 155 の制御の一例を示すタイミングチャートである。例えば、電流指令値 S 7 が A 180 であるときに荷電粒子ビームを出射する場合、タイミング制御部 310 は、電流指令値 S 7 が A 180 になったタイミングでクロック信号 S 2 を停止する。これによって、偏向電磁石 130 a から 130 d に供給される電流を一定にすることができるため、荷電粒子ビームのエネルギーを一定にすることができる。

20

#### 【0049】

荷電粒子ビームのエネルギーを一定にした後、タイミング制御部 310 は、遮断器 155 を閉じるための遮断器駆動信号 S 15 を遮断器制御部 390 に出力する。遮断器制御部 390 は、遮断器駆動信号 S 15 が ON の間、遮断器 155 に遮断器用電力 S 16 を供給する。遮断器用電力 S 16 が遮断器 155 に供給されると、遮断器 155 は、出射器 150 から照射装置 200 に向かう荷電粒子ビームの経路を遮断する。

30

#### 【0050】

遮断器 155 が閉じられた後、タイミング制御部 310 は、所定時間 T が経過するまで、荷電粒子ビームを加速器 100 内の周回軌道から出射させるためのビーム出射信号 S 13 を出射器制御部 380 に出力する。出射器制御部 380 は、ビーム出射信号 S 13 に応じて、出射器 150 に出射用電力 S 14 を供給する。出射用電力 S 14 が出射器 150 に供給されると、出射器 150 は、荷電粒子ビームを加速器 100 内の周回軌道から照射装置 200 に向けて出射する。

40

#### 【0051】

しかしながら、遮断器 155 が閉じられているため、照射装置 200 に向けて出射された荷電粒子ビームは、遮断器 155 によって遮断される。このように、プレ出射が行われることによって、ビームスパイクが発生した荷電粒子ビームが照射装置 200 に到達することを防止することができる。所定時間 T が経過するまでプレ出射が行われた後、タイミング制御部 310 は、ビーム出射信号 S 13 の出力を停止する。これによって、出射器 150 は、荷電粒子ビームの出射を停止する。

40

#### 【0052】

荷電粒子ビームの出射が停止された後、タイミング制御部 310 は、遮断器駆動信号 S 15 の出力を停止する。これによって、遮断器 155 が閉状態から開状態に移行し、出射器 150 から照射装置 200 に向かう荷電粒子ビームの経路が開放される。その後、タイミング制御部 310 は、本出射を行うため、ビーム出射信号 S 13 を出射器制御部 380 に出力し、出射器 150 から照射装置 200 に荷電粒子ビームを出射させる。

50

#### 【0053】

しかしながら、荷電粒子ビームのエネルギーが低く（例えば、140 [MeV] 未満）、かつ荷電粒子ビームの電荷量が多い（言い換えると、加速器100を周回する荷電粒子ビームの個数が多い）場合、所定時間Tが経過するまで荷電粒子ビームを遮断するプレ出射が行われても、ビームスパイクが発生する場合がある。この場合、図4に示されるように、照射装置200の線量モニタ210によって、荷電粒子ビームの強度が目標値を超えるビームスパイクの発生が検出される。このため、ビームスパイクの発生を防止するために、プレ出射制御部312は、プレ出射を継続する時間を制御する必要がある。

#### 【0054】

図5は、第1の実施形態に係る遮断器155の制御の一例を示すタイミングチャートである。図5において、閾値TH180は、電流指令値S7がA180である場合における荷電粒子ビームの電荷量の閾値である。プレ出射制御部312は、荷電粒子ビームの電荷量が閾値TH180未満になるまで（時間Taが経過するまで）プレ出射を継続する。これによって、低エネルギーの荷電粒子ビームを出射する場合であっても、ビームスパイクの発生を防止することができる。以下、プレ出射制御について具体的に説明する。

#### 【0055】

前述したように、電荷量算出部311は、電流値検出部190によって検出された電流値S17を、周波数検出部341によって検出された周波数S18で除算することによって、荷電粒子ビームの電荷量を算出する。具体的には、電荷量算出部311は、以下の式（1）に基づいて、荷電粒子ビームの電荷量を算出する。

#### 【0056】

荷電粒子ビームの電荷量 [C] = 電流値 [A] / 周波数 [Hz] …… 式（1）

#### 【0057】

タイミング制御部310は、荷電粒子ビームのエネルギーと、荷電粒子ビームの電荷量（ビーム電荷量）の閾値とが対応付けられた電荷量閾値テーブル313を保持する。例えば、電荷量閾値テーブル313は、加速器制御装置300に設けられたメモリに記憶されたテーブルである。

#### 【0058】

図6は、第1の実施形態に係る電荷量閾値テーブル313の一例を示す図である。電荷量閾値テーブル313は、エネルギー番号とビーム電荷量の閾値とが対応付けられたテーブルである。具体的には、エネルギー番号1から200のそれぞれに、閾値100 [nC] から1 [nC] が対応付けられている。なお、エネルギー番号1は430 [MeV]、…、エネルギー番号200は50 [MeV] である。電荷量閾値テーブル313は、荷電粒子ビームのエネルギーが低いほど、当該エネルギーに対応付けられる閾値が小さくなるように設定されている。

#### 【0059】

タイミング制御部310のプレ出射制御部312は、加速器100内を周回する荷電粒子ビームのエネルギーに対応する閾値を電荷量閾値テーブル313から取得する。プレ出射制御部312は、電荷量算出部311によって算出された電荷量と、電荷量閾値テーブル313から取得された閾値との比較に基づいて、遮断器155の動作タイミングを制御する。

#### 【0060】

例えば、タイミング制御部310は、電荷量算出部311によって算出された電荷量が、電荷量閾値テーブル313から取得された閾値以上の場合には、遮断器155を制御して荷電粒子ビームを遮断させる。一方、タイミング制御部310は、電荷量算出部311によって算出された電荷量が、電荷量閾値テーブル313から取得された閾値未満の場合には、遮断器155を制御して荷電粒子ビームを通過させる。

#### 【0061】

具体的に、A180に対応するエネルギーで荷電粒子ビームを出射する場合、プレ出射制御部312は、A180のエネルギーに対応する閾値TH180を電荷量閾値テーブル313から取得する。プレ出射制御部312は、電荷量算出部311によって算出された

10

20

30

40

50

電荷量が閾値  $TH180$  以上の場合には、遮断器 155 を閉じてプレ出射を行う。一方、プレ出射制御部 312 は、電荷量算出部 311 によって算出された電荷量が閾値  $TH180$  未満になったことに応じて、プレ出射を終了して、遮断器 155 を開放する。プレ出射が終了した後、タイミング制御部 310 は、照射装置 200 に荷電粒子ビームを出射するための本出射を行う。

#### 【0062】

以上説明したように、プレ出射制御部 312 は、荷電粒子ビームの電荷量が閾値未満になるまでプレ出射を継続する。これによって、低エネルギーの荷電粒子ビームを出射する場合であっても、ビームスパイクの発生を防止することができる。本実施形態においては、図 5 に示されるように、照射装置 200 の線量モニタ 210 によってビームスパイクの発生が検出されない。

10

#### 【0063】

図 6 に示されるビーム電荷量の閾値は、ビーム調整試験において予め調整される。治療時においては、調整された閾値に基づいてプレ出射が行われる。例えば、加速器 100 を周回する荷電粒子ビームの電荷量の最高値が  $10 [nC]$  であるとする。この場合、図 6 に示されるように、 $10 [nC]$  より極端に大きい値（例えば、 $100 [nC]$ ）を、高エネルギーに対応する閾値として設定してもよい。これによって、高エネルギーの荷電粒子ビームが出射される場合、加速器 100 内の荷電粒子ビームの電荷量が既に閾値を下回っていることになるため、プレ出射制御部 312 は、プレ出射の時間延長を行わない。このため、プレ出射制御部 312 は、所定時間  $T$  が経過するまでプレ出射を行った後、荷電粒子ビームを出射することが可能となる。

20

#### 【0064】

図 7 は、第 1 の実施形態に係る電荷量閾値テーブル 313 の他の例を示す図である。図 7 に示されるように、電荷量閾値テーブル 313 において、境界エネルギー番号が設定されてもよい。また、電荷量閾値テーブル 313 において、エネルギー番号 1 から境界エネルギー番号までのビーム電荷量閾値 1 と、境界エネルギー番号 + 1 からエネルギー番号 200（最大値）までのビーム電荷量閾値 2 とが設定されてもよい。

#### 【0065】

具体的に、図 7 に示される例において、ビーム電荷量閾値（ $20 [nC]$ ）が、エネルギー番号 1 から 180 に対応付けられ、ビーム電荷量閾値（ $1 [nC]$ ）が、エネルギー番号 181 から 200 に対応付けられている。

30

#### 【0066】

図 8 は、第 1 の実施形態に係る電荷量閾値テーブル 313 の他の例を示す図である。図 8 に示されるように、電荷量閾値テーブル 313 において、境界エネルギー番号 1 および境界エネルギー番号 2 が設定されてもよい。また、電荷量閾値テーブル 313 において、エネルギー番号 1 から境界エネルギー番号 1 までのビーム電荷量閾値 1 と、境界エネルギー番号 1 + 1 から境界エネルギー番号 2 までのビーム電荷量閾値 2 と、境界エネルギー番号 2 + 1 からエネルギー番号 200（最大値）までのビーム電荷量閾値 3 とが設定されてもよい。

#### 【0067】

具体的に、図 8 に示される例において、ビーム電荷量閾値（ $10 [nC]$ ）が、エネルギー番号 1 から 150 に対応付けられ、ビーム電荷量閾値（ $2 [nC]$ ）が、エネルギー番号 151 から 180 に対応付けられ、ビーム電荷量閾値（ $1 [nC]$ ）が、エネルギー番号 181 から 200 に対応付けられている。

40

#### 【0068】

図 7 や図 8 に示される例のように、電荷量閾値テーブル 313 は、エネルギーの範囲を区切るための境界エネルギーを含んでもよく、境界エネルギーによって区切られたエネルギーの範囲ごとに、荷電粒子ビームの電荷量の閾値が対応付けられてもよい。これによって、電荷量閾値テーブル 313 のデータ量を削減することができる。

#### 【0069】

50

図 9 は、第 1 の実施形態に係る遮断器 155 の制御の他の例を示すタイミングチャートである。具体的には、図 9 は、エネルギー 1 段目 (A 1) の荷電粒子ビームおよびエネルギー 180 段目 (A 180) の荷電粒子ビームを出射する制御を示すタイミングチャートである。

【0070】

入射器 110 によって加速器 100 に入射された荷電粒子ビームは、加速器 100 によって加速される。クロック信号 S 2 がエネルギー 1 段目 (A 1) に対応するカウント値に到達すると、タイミング制御部 310 は、クロック信号 S 2 を停止する。これによって、荷電粒子ビームのエネルギーが一定値 (A 1) に保持される。このとき、荷電粒子ビームの電荷量は閾値 TH1 未満であるため、所定時間 T が経過するまでプレ出射が行われる。プレ出射が終了した後、エネルギー 1 段目 (A 1) の本出射が行われる。

10

【0071】

エネルギー 1 段目 (A 1) の本出射が終了すると、タイミング制御部 310 は、クロック信号 S 2 の供給を再開する。クロック信号 S 2 がエネルギー 180 段目 (A 180) に対応するカウント値に到達すると、タイミング制御部 310 は、クロック信号 S 2 を停止する。これによって、荷電粒子ビームのエネルギーが一定値 (A 180) に保持される。このとき、荷電粒子ビームの電荷量は閾値 TH180 よりも大きいため、所定時間 Tp が経過するまで (荷電粒子ビームの電荷量が閾値 TH180 未満になるまで) プレ出射が行われる。プレ出射が終了した後、エネルギー 180 段目 (A 180) の本出射が行われる。

20

【0072】

これによって、エネルギーの異なる複数の本出射が行われる場合であっても、いずれの本出射においても、ビームスパイクの発生を防止することができる。

【0073】

以上説明したように、第 1 の実施形態において、タイミング制御部 310 は、加速器 100 内を周回する荷電粒子ビームの電流値に基づいて、加速器 100 から出射された荷電粒子ビームを遮断する遮断器 155 の動作タイミングを制御する。具体的には、タイミング制御部 310 は、電流値検出部 190 によって検出された電流値に基づいて、荷電粒子ビームの電荷量を算出し、算出した荷電粒子ビームの電荷量に基づいて、遮断器 155 の動作タイミングを制御する。これによって、低エネルギーの荷電粒子ビームを出射する場合であっても、ビームスパイクの発生を防止することができる。

30

【0074】

(第 2 の実施形態)

第 1 の実施形態において、タイミング制御部 310 は、加速器 100 から出射された荷電粒子ビームを遮断する遮断器 155 の動作タイミングを制御することとした。これに対し、第 2 の実施形態において、タイミング制御部 310 は、遮断器 155 の動作タイミングの制御に加えて、チョッパ 115 を駆動するためのチョッパパルス信号のパルス幅を制御することとする。以下、第 2 の実施形態について詳細に説明する。

【0075】

図 10 は、第 2 の実施形態に係る加速器制御装置 300 の構成を示すブロック図である。図 10 において、図 2 の各部に対応する部分には同一の符号を付し、説明を省略する。

40

【0076】

タイミング制御部 310 は、電荷量算出部 311 と、プレ出射制御部 312 と、電荷量閾値テーブル 313 とに加えて、パルス幅制御部 314 と、パルス幅閾値テーブル 315 (第 2 テーブル) とを備える。パルス幅閾値テーブル 315 は、加速器制御装置 300 に設けられたメモリに記憶されたテーブルである。

【0077】

パルス幅制御部 314 は、ビームスパイクの発生を防止するために、チョッパパルス信号 S 9 のパルス幅制御を行う。パルス幅制御部 314 は、パルス幅制御を行うことで、加速器 100 内の周回軌道に入射される荷電粒子ビームの量を調整する。

50

## 【 0 0 7 8 】

図 1 1 は、第 2 の実施形態に係る遮断器 1 5 5 およびチョッパ 1 1 5 の制御の一例を示すタイミングチャートである。図 1 1 において、図 5 の各部に対応する部分には同一の符号を付し、説明を省略する。図 1 1 は、低エネルギー（A 1 8 0）で荷電粒子ビームを出射する場合のタイミングチャートである。

## 【 0 0 7 9 】

低エネルギー（A 1 8 0）で荷電粒子ビームを出射する場合には、ビームスパイクが発生しやすいため、予め荷電粒子ビームの電荷量を小さくしておくことが望ましい。このため、チョッパ制御部 3 6 0 は、荷電粒子ビームが加速器 1 0 0 から出射される際の荷電粒子ビームのエネルギーに基づいてチョッパ 1 1 5 を制御することによって、加速器 1 0 0 内の周回軌道に入射される荷電粒子ビームの量を調整する。

10

## 【 0 0 8 0 】

前述の図 5 に示される例においては、加速器 1 0 0 内の周回軌道に入射される荷電粒子ビームの量が多いため、プレ出射に長時間 T a を要することとなる。一方、図 1 1 に示される例において、パルス幅制御部 3 1 4 は、チョッパ制御部 3 6 0 に出力するチョッパパルス信号 S 9 のパルス幅を制御することで、加速器 1 0 0 内の周回軌道に入射される荷電粒子ビームの量を少なくする。これによって、荷電粒子ビームの電荷量が小さくなるため、プレ出射を短時間 T b で終了させることができる。また、プレ出射に要する時間を短縮化することで、治療効率を向上することができ、患者に対する負担を軽減することができる。

20

## 【 0 0 8 1 】

図 1 2 は、第 2 の実施形態に係るパルス幅閾値テーブル 3 1 5 の一例を示す図である。パルス幅閾値テーブル 3 1 5 は、荷電粒子ビームのエネルギーと、チョッパ 1 1 5 を駆動するためのチョッパパルス信号のパルス幅とが対応付けられたテーブルである。具体的には、エネルギー番号 1 から 2 0 0 のそれぞれに、チョッパパルス幅 4 0 [  $\mu$  s ] から 1 0 [  $\mu$  s ] が対応付けられている。なお、エネルギー番号 1 は 4 3 0 [ MeV ]、・・・、エネルギー番号 2 0 0 は 5 0 [ MeV ] である。パルス幅閾値テーブル 3 1 5 は、荷電粒子ビームのエネルギーが低いほど、当該エネルギーに対応付けられるパルス幅が小さくなるように設定されている。

## 【 0 0 8 2 】

パルス幅制御部 3 1 4 は、荷電粒子ビームが加速器 1 0 0 から出射される際の荷電粒子ビームのエネルギーに対応するパルス幅をパルス幅閾値テーブル 3 1 5 から取得する。チョッパ制御部 3 6 0 は、パルス幅制御部 3 1 4 によって取得されたパルス幅に基づいて、チョッパ 1 1 5 の動作タイミングを制御する。

30

## 【 0 0 8 3 】

例えば、チョッパ制御部 3 6 0 は、パルス幅制御部 3 1 4 によって取得されたパルス幅に基づいて、チョッパ用電力 S 1 0 をチョッパ 1 1 5 に供給する時間を制御する。具体的に、チョッパ制御部 3 6 0 は、チョッパパルス幅が 1 0 [  $\mu$  s ] の場合、チョッパ用電力 S 1 0 の供給時間を 1 0 [  $\mu$  s ] とする。

## 【 0 0 8 4 】

以上説明したように、パルス幅制御部 3 1 4 は、荷電粒子ビームが加速器 1 0 0 から出射される際の荷電粒子ビームのエネルギーに基づいて、チョッパ 1 1 5 を駆動するためのチョッパパルス幅を制御する。具体的に、パルス幅制御部 3 1 4 は、荷電粒子ビームが加速器 1 0 0 から出射される際の荷電粒子ビームのエネルギーが小さい場合、チョッパパルス幅を小さくすることにより、加速器 1 0 0 内の周回軌道に入射される荷電粒子ビームの量を少なくする。これによって、プレ出射に要する時間を短縮化することができる。

40

## 【 0 0 8 5 】

図 1 3 は、第 2 の実施形態に係るパルス幅閾値テーブル 3 1 5 の他の例を示す図である。図 1 3 に示されるように、パルス幅閾値テーブル 3 1 5 において、境界エネルギー番号が設定されてもよい。また、パルス幅閾値テーブル 3 1 5 において、エネルギー番号 1 が

50

ら境界エネルギー番号までのチョッパパルス幅 1 と、境界エネルギー番号 + 1 からエネルギー番号 200 ( 最大値 ) までのチョッパパルス幅 2 とが設定されてもよい。

【 0086 】

具体的に、図 13 に示される例において、チョッパパルス幅 ( 30 [  $\mu$ s ] ) が、エネルギー番号 1 から 180 に対応付けられ、チョッパパルス幅 ( 10 [  $\mu$ s ] ) が、エネルギー番号 181 から 200 に対応付けられている。

【 0087 】

図 14 は、第 2 の実施形態に係るパルス幅閾値テーブル 315 の他の例を示す図である。図 14 に示されるように、パルス幅閾値テーブル 315 において、境界エネルギー番号 1 および境界エネルギー番号 2 が設定されてもよい。また、パルス幅閾値テーブル 315 において、エネルギー番号 1 から境界エネルギー番号 1 までのチョッパパルス幅 1 と、境界エネルギー番号 1 + 1 から境界エネルギー番号 2 までのチョッパパルス幅 2 と、境界エネルギー番号 2 + 1 からエネルギー番号 200 ( 最大値 ) までのチョッパパルス幅 3 とが設定されてもよい。

10

【 0088 】

具体的に、図 14 に示される例において、チョッパパルス幅 ( 30 [  $\mu$ s ] ) が、エネルギー番号 1 から 100 に対応付けられ、チョッパパルス幅 ( 20 [  $\mu$ s ] ) が、エネルギー番号 101 から 180 に対応付けられ、チョッパパルス幅 ( 10 [  $\mu$ s ] ) が、エネルギー番号 181 からエネルギー番号 200 に対応付けられている。

【 0089 】

図 13 や図 14 に示される例のように、パルス幅閾値テーブル 315 は、エネルギーの範囲を区切るための境界エネルギーを含んでもよく、境界エネルギーによって区切られたエネルギーの範囲ごとに、チョッパパルス幅が対応付けられてもよい。これによって、パルス幅閾値テーブル 315 のデータ量を削減することができる。

20

【 0090 】

以上説明したように、第 2 の実施形態において、タイミング制御部 310 は、荷電粒子ビームが加速器 100 から出射される際の荷電粒子ビームのエネルギーに対応するパルス幅をパルス幅閾値テーブル 315 から取得する。チョッパ制御部 360 は、タイミング制御部 310 によって取得されたパルス幅に基づいて、チョッパ 115 の動作タイミングを制御する。これによって、ビームスパイクの発生を防止することができるとともに、プレ出射に要する時間を短縮化することができる。

30

【 0091 】

( 第 3 の実施形態 )

第 1 の実施形態および第 2 の実施形態のタイミング制御部 310 は、加速器 100 内を周回する荷電粒子ビームの電流値に基づいて荷電粒子ビームの電荷量を算出し、算出した荷電粒子ビームの電荷量に基づいて、遮断器 155 の動作タイミングを制御することとした。これに対し、第 3 の実施形態のタイミング制御部 310 は、荷電粒子ビームの電荷量を算出することなく、加速器 100 内を周回する荷電粒子ビームの電流値 ( ビーム電流 ) に基づいて、遮断器 155 の動作タイミングを制御することとする。以下、第 3 の実施形態について詳細に説明する。

40

【 0092 】

図 15 は、第 3 の実施形態に係る加速器制御装置 300 の構成を示すブロック図である。図 15 において、図 10 の各部に対応する部分には同一の符号を付し、説明を省略する。

【 0093 】

本実施形態において、タイミング制御部 310 は荷電粒子ビームの電荷量を算出しないため、電荷量算出部 311 を備えない。また、高周波電力制御部 340 は、周波数検出部 341 を備えない。一方、タイミング制御部 310 は、プレ出射制御部 312、パルス幅制御部 314、およびパルス幅閾値テーブル 315 に加えて、電流値閾値テーブル 316 ( 第 3 テーブル ) を備える。電流値閾値テーブル 316 は、加速器制御装置 300 に設け

50

られたメモリに記憶されたテーブルである。

【0094】

図16は、第3の実施形態に係る電流値閾値テーブル316の一例を示す図である。電流値閾値テーブル316は、エネルギー番号とビーム電流の閾値とが対応付けられたテーブルである。具体的には、エネルギー番号1から200のそれぞれに、閾値50[mA]から0.5[mA]が対応付けられている。なお、エネルギー番号1は430[MeV]、・・・、エネルギー番号200は50[MeV]である。電流値閾値テーブル316は、荷電粒子ビームのエネルギーが低いほど、当該エネルギーに対応付けられる閾値が小さくなるように設定されている。

【0095】

タイミング制御部310は、加速器100内を周回する荷電粒子ビームのエネルギーに対応する閾値を電流値閾値テーブル316から取得する。また、タイミング制御部310のプレ出射制御部312は、加速器100内を周回する荷電粒子ビームの電流値と、電流値閾値テーブル316から取得された閾値との比較に基づいて、遮断器155の動作タイミングを制御する。

【0096】

例えば、タイミング制御部310は、電流値検出部190によって検出された電流値が、電流値閾値テーブル316から取得された閾値以上の場合には、遮断器155を制御して荷電粒子ビームを遮断させる。一方、タイミング制御部310は、電流値検出部190によって検出された電流値が、電流値閾値テーブル316から取得された閾値未満の場合には、遮断器155を制御して荷電粒子ビームを通過させる。

【0097】

以上説明したように、プレ出射制御部312は、荷電粒子ビームの電流値が閾値未満になるまでプレ出射を継続する。これによって、ビームスパイクの発生を防止することができる。また、電荷量算出部311および周波数検出部341を必要としないため、加速器制御装置300を低コスト化することができる。

【0098】

図17は、第3の実施形態に係る電流値閾値テーブル316の他の例を示す図である。図17に示されるように、電流値閾値テーブル316において、境界エネルギー番号が設定されてもよい。また、電流値閾値テーブル316において、エネルギー番号1から境界エネルギー番号までのビーム電流閾値1と、境界エネルギー番号+1からエネルギー番号200(最大値)までのビーム電流閾値2とが設定されてもよい。

【0099】

具体的に、図17に示される例において、ビーム電流閾値(10[mA])が、エネルギー番号1から180に対応付けられ、ビーム電流閾値(0.5[mA])が、エネルギー番号181から200に対応付けられている。

【0100】

図18は、第3の実施形態に係る電流値閾値テーブル316の他の例を示す図である。図18に示されるように、電流値閾値テーブル316において、境界エネルギー番号1および境界エネルギー番号2が設定されてもよい。また、電流値閾値テーブル316において、エネルギー番号1から境界エネルギー番号1までのビーム電流閾値1と、境界エネルギー番号1+1から境界エネルギー番号2までのビーム電流閾値2と、境界エネルギー番号2+1からエネルギー番号200(最大値)までのビーム電流閾値3とが設定されてもよい。

【0101】

具体的に、図18に示される例において、ビーム電流閾値(5[mA])が、エネルギー番号1から150に対応付けられ、ビーム電流閾値(1[mA])が、エネルギー番号151から180に対応付けられ、ビーム電流閾値(0.25[mA])が、エネルギー番号181から200に対応付けられている。

【0102】

10

20

30

40

50



図 17 や図 18 に示される例のように、電流値閾値テーブル 316 は、エネルギーの範囲を区切るための境界エネルギーを含んでもよく、境界エネルギーによって区切られたエネルギーの範囲ごとに、荷電粒子ビームの電流値の閾値が対応付けられてもよい。これによって、電流値閾値テーブル 316 のデータ量を削減することができる。

#### 【0103】

以上説明した少なくともひとつの実施形態によれば、加速器制御装置 300 は、高周波電力制御部 340 と、タイミング制御部 310 とを持つ。高周波電力制御部 340 は、荷電粒子ビームを加速させるための高周波電力を加速器 100 に供給する。タイミング制御部 310 は、加速器 100 内を周回する荷電粒子ビームの電流値に基づいて、加速器 100 から出射された荷電粒子ビームを遮断する遮断器 155 の動作タイミングを制御する。これによって、低エネルギーの荷電粒子ビームを出射する場合であっても、ビームスパイクの発生を防止することができる。

10

#### 【0104】

本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更を行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれると同様に、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれるものである。

20

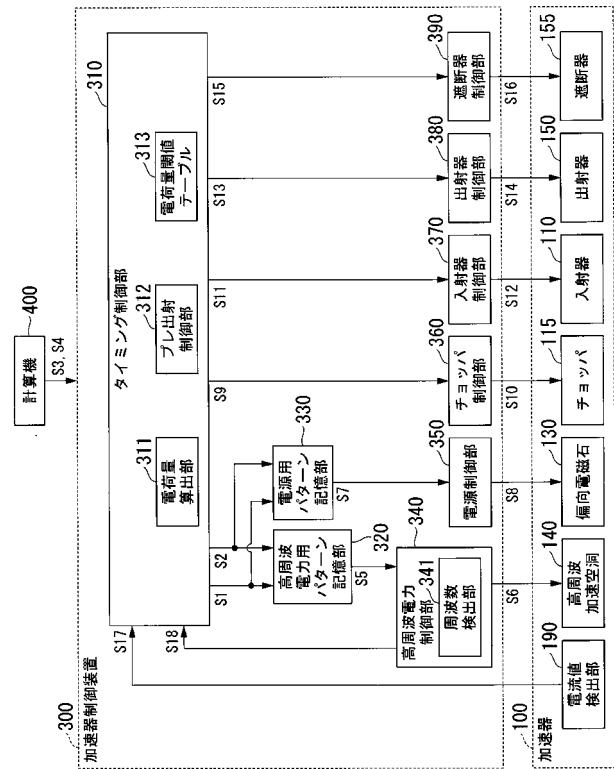
#### 【符号の説明】

#### 【0105】

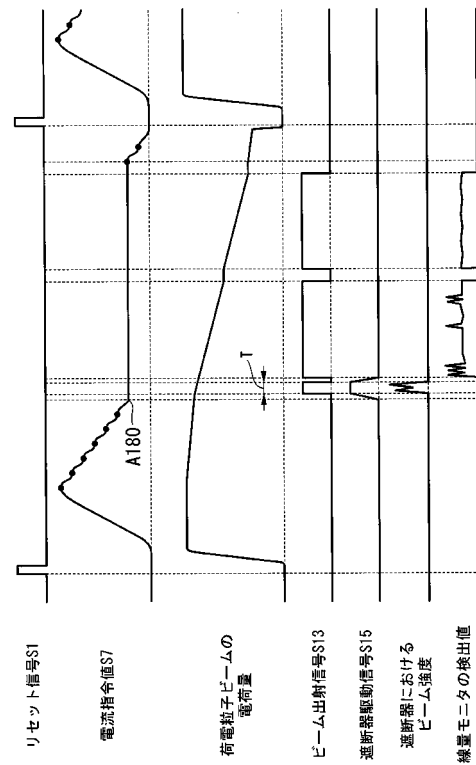
10 ... 粒子線治療装置、100 ... 加速器、110 ... 入射器、115 ... チョップパ、120 ... 四極電磁石、130 ... 偏向電磁石、140 ... 高周波加速空洞、150 ... 出射器、155 ... 遮断器、160 ... 四極電磁石、170 ... 補正電磁石、180 ... 偏向電磁石、190 ... 電流値検出部、200 ... 照射装置、210 ... 線量モニタ、300 ... 加速器制御装置、310 ... タイミング制御部、311 ... 電荷量算出部、312 ... プレ出射制御部、313 ... 電荷量閾値テーブル、314 ... パルス幅制御部、315 ... パルス幅閾値テーブル、316 ... 電流値閾値テーブル、320 ... 高周波電力用パターン記憶部、330 ... 電源用パターン記憶部、340 ... 高周波電力制御部、341 ... 周波数検出部、350 ... 電源制御部、360 ... チョップパ制御部、370 ... 入射器制御部、380 ... 出射器制御部、390 ... 遮断器制御部、400 ... 計算機

30

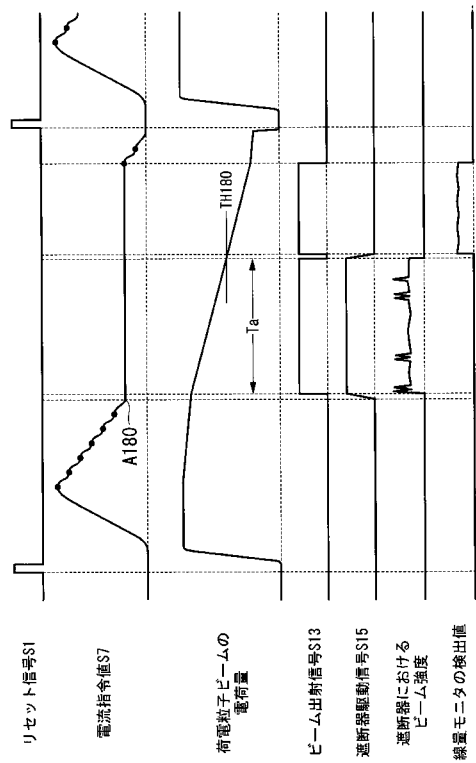
【 図 2 】



【 図 4 】



【図5】



【図6】

	エネルギー番号	ビーム電荷量閾値
高エネルギー ↑	1	100
	2	100
	3	100
	...	100
	n	1.4
	...	1.3
	198	1.2
低エネルギー	199	1.1
	200	1

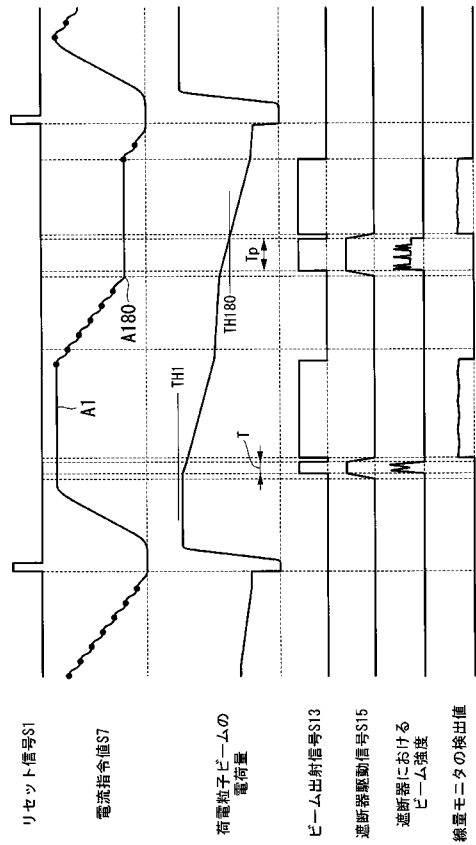
【図7】

パラメータ内容	値
境界エネルギー番号	180
ビーム電荷量閾値1	20
ビーム電荷量閾値2	1

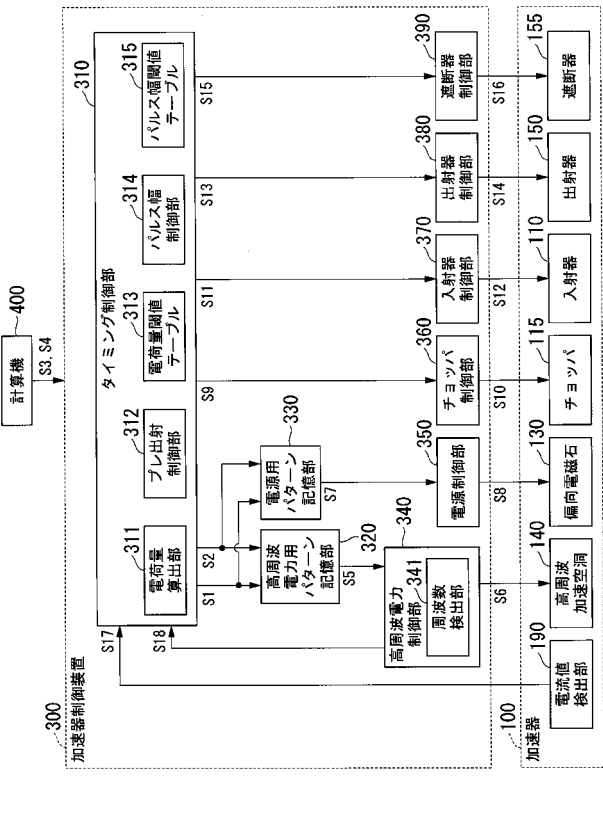
【図8】

パラメータ内容	値
境界エネルギー番号1	150
境界エネルギー番号2	180
ビーム電荷量閾値1	10
ビーム電荷量閾値2	2
ビーム電荷量閾値3	1

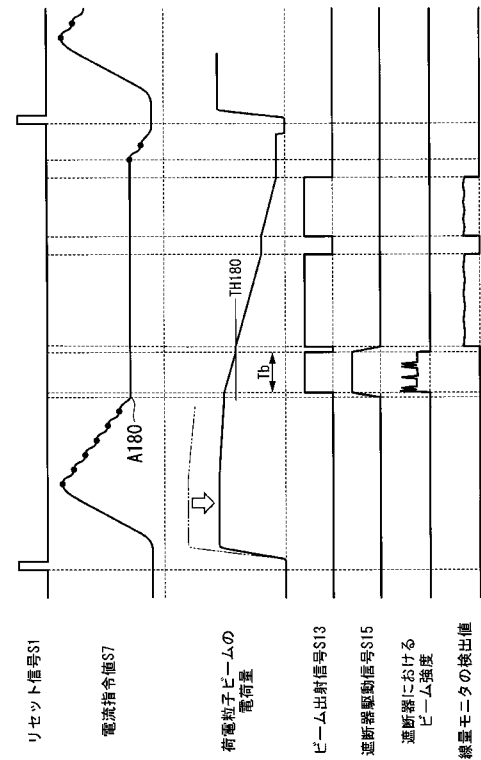
【図9】



【図10】



【図 1 1】



【図 1 2】

	エネルギー番号	チョップパルス幅
高エネルギー	1	40
	2	35
	3	30
	...	
	n	
	...	
低エネルギー	198	10
	199	10
	200	10

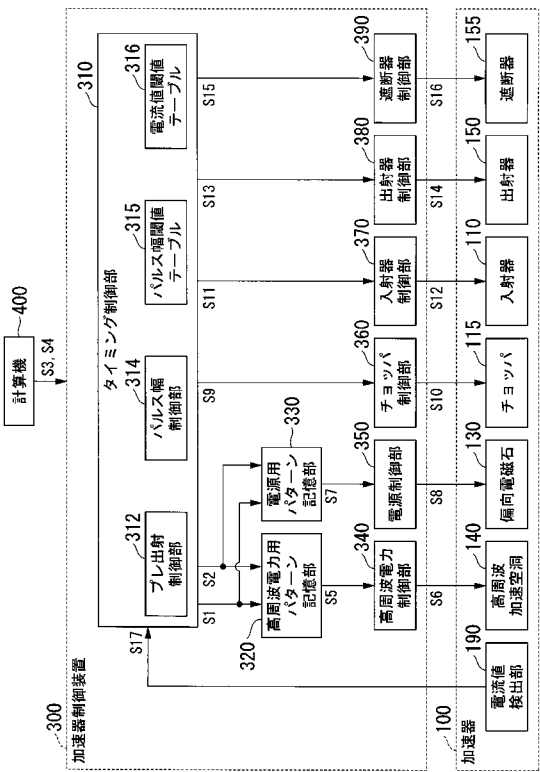
【図 1 3】

パラメータ内容	値
境界エネルギー番号	180
チョップパルス幅1	30
チョップパルス幅2	10

【図 1 4】

パラメータ内容	値
境界エネルギー番号1	100
境界エネルギー番号2	180
チョップパルス幅1	30
チョップパルス幅2	20
チョップパルス幅3	10

【図 1 5】



【図 1 6】

	エネルギー番号	ビーム電流閾値
高エネルギー	1	50
	2	50
	3	50
	...	50
	n	0.7
	...	0.65
低エネルギー	198	0.3
	199	0.5
	200	0.5

【図 1 7】

パラメータ内容	値
境界エネルギー番号	180
ビーム電流閾値1	10
ビーム電流閾値2	0.5

【図 1 8】

パラメータ内容	値
境界エネルギー番号1	150
境界エネルギー番号2	180
ビーム電流閾値1	5
ビーム電流閾値2	1
ビーム電流閾値3	0.25

---

フロントページの続き

- (72)発明者 古川 卓司  
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所内
- (72)発明者 水島 康太  
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所内
- (72)発明者 塙 勝詞  
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- Fターム(参考) 2G085 AA13 BA13 BE07 CA04 CA22 CA24 CA27  
4C082 AA01 AC04 AE01 AG06 AG13 AT01 AT03